第41卷 第8期
2024年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 8
Aug. 2024

1979—2020年柴达木盆地人体舒适度指数时空变化及趋势分析

张群慧[1]， 常 亮[1,2,3]， 顾小凡[1,2,3]， 王 倩[1]， 马卯楠[4]，
李小等[1]， 段 瑞[1]， 犹香智[1]

（1. 中国地质调查局西安地质调查中心，陕西 西安 710054；2. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心，陕西 西安 710054；3. 中国地质调查局干旱-半干旱区地下水与生态重点实验室，陕西 西安 710054；4. 中国地质大学地质调查研究院，湖北 武汉 430074）

摘 要：开展柴达木盆地气候舒适性评价对盆地人居环境、气候宜居资源开发、生态文明建设具有重要意义。本研究基于1979—2020年长时间序列地表气象数据集，利用人体舒适度指数，分析了柴达木盆地年际尺度和季节尺度人体舒适性时空变化特征。结果表明：（1）全盆地多年平均及不同季节内人体舒适度均处于增加的趋势，除夏季平原区部分区域处于舒适等级，其他均处于冷不舒适的状况；（2）人体舒适度指数变化与气温的变化具有最强的相关性，相关系数全盆地达到0.9以上，其次为风速和湿度，山区较平原区相关性较弱；（3）通过变化趋势和Hurst指数综合分析，发现气温和比湿继续增加且具有强持续性，风速继续减小且强持续性；人体舒适度指数除秋季山区持续性弱外，其他季节山区和平原区均具有强持续增加的趋势。该研究可为柴达木盆地和高寒地区气候舒适性研究提供一定参考。

关键词：人体舒适度指数；时空变化；未来趋势；气象影响因素；柴达木盆地

自工业化以来人类活动的影响已经使得大气、海洋和陆地呈现变暖趋势。IPCC第六次气候变化评价报告指出，这种变暖的趋势未来仍会持续[1-2]。全球变暖给自然界和人类社会造成了广泛而普遍的改变[3-4]。气候变化对人类的影响最直观地体现在人类体感和健康上[5]，气温、湿度等气象要素的变化对人体直接产生不同的舒适程度，以气候引发的热浪为例，严重程度不可忽视且愈加显著[6-7]。因此，对气候舒适性的研究越来越重要。

近年来，国内外研究学者对气候舒适性评价的探究不断增多不断深入，评价指数和层次不断丰富[8-10]，针对不同研究目的、不同区域发展了丰富的气候舒适性评价指标[11-13]，包括利用较为单一的气象指数[14]、考虑多要素的温湿指数、风寒指数等[15-16]和较为复杂的气候舒适性评价模型[17-18]等，为城市建设、人居健康、旅游资源管理等方面提供了重要参考。其中，针对我国区域内的气候舒适性研究中，人体舒适度指数是反映气候舒适性的一个应用广泛且高效的指标，该指数指在自然环境中，不采取任何措施下人体感受到的舒适程度；利用温度、湿度和风速三个气象要素进行等级划分可直观且有效的量化气候变化对人体舒适性的影响，明晰人们对气候的感知变化，为人居环境研究、城市建设等提供理论支撑[19-20]。目前，研究学者利用人体舒适度指数在我国很多地区已开展了不同程度的舒适性评价研究，包括北京[21]、陕西[22]、山东[23]、辽宁[24]等不同省份、山区[25]和高原[26]等不同地貌形态，以及旅游景区[27]等。

西北内陆柴达木盆地地区因其独特的地理位置、地形地貌和丰富的资源，成为旅游开发和科学研究的热点[28]，而当前对其气候舒适性评价的探究相对欠缺。因此，本研究利用高时空分辨率气象要素数据集，基于人体舒适度指数，对柴达木盆地开展1979—2020年长时间序列人体舒适性评价，将研

收稿日期：2023-11-18； **修订日期：**2024-02-21
基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20230301）；青海省环境地质勘查局科技项目（2023-ZK-01）
作者简介：张群慧（1993-），女，博士，助理研究员，主要从事干旱区气候变化研究. E-mail: qunhui_zhang321@163.com

究区细分为山区和平原区，厘清季节尺度、年际尺度柴达木盆地人体舒适性时空变化，分析影响其变化的气象要素，利用Hurst指数预测柴达木盆地人体舒适度指数的未来走向趋势，以期为柴达木盆地人居适宜度研究、城市规划、旅游开发提供参考。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

柴达木盆地地处“世界屋脊”“第三极”——青藏高原之上，位于34°41′~39°20′N、87°48′~99°18′E之间（图1），行政区划分属青海省、甘肃省以及新疆。柴达木盆地四周高山围绕，西南方向与昆仑山和三江源自然保护区相接，北部以阿尔金山与塔里木盆地相隔。东边祁连山和鄂拉山分别与河西走廊与共和盆地相接。柴达木盆地气候高寒干旱，由于地域辽阔、地形复杂，盆地又可分为干旱荒漠区和高寒山区。柴达木盆地中心为干旱荒漠区，降水稀少，气候干燥，气温较高。盆地四周为高寒山地，该区地势高峻、气候寒冷，海拔在2600~6600 m之间，年均气温在0 ℃以下的时间长达6个月以上。

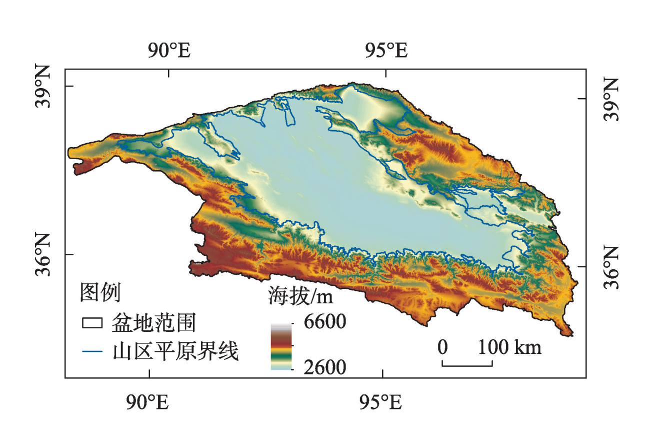


图1　柴达木盆地地形及位置图

Fig. 1　Topography and location map of the Qaidam Basin

盆地内地貌形态多样，景色各异，是重要的旅游开发建设区域之一。其中，地质遗迹类型多样，规模较大，较为珍贵，包括古生物类、冰川类和山石水景等风景地貌类，具有较高的科学、经济、美学价值以及医疗康养价值，开发前景广阔[29]。根据中国人口空间分布公里网格数据集（源于中国科学院资源环境科学与数据中心，http://www.resdc.cn/），盆地内人口平均空间分布密度约为1人·km^{-2}，人口较为密集区域分布在盆地东南部。开展柴达木盆地人体舒适度指数时空格局及其演变规律研究，为盆地内气候舒适性研究、旅游开发和城市建设提供科学参考。

1.2　数据来源与处理

本研究中使用的气象要素数据来自第三极地区长时间序列高分辨率地面气象要素驱动数据集（TPMFD）[30]，来源于国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn）。该数据涵盖了1979—2020年，空间分辨率为1/30°，包含降水、气温、比湿、风速、气压等多个变量。因该数据具有较高的时空分辨率，且融合了可靠的站点观测数据、高分辨率模型模拟结果、再分析数据等，已逐渐被用来开展青藏高原地区陆面过程及气候变化研究[31-32]。本文中所用到的变量包括气温、比湿和风速、气压，其中利用气压、比湿和气温来估算相对湿度，用于人体舒适度指数的计算。

文中除对全盆地的结果进行分析外，考虑到该区域内地形和气候的空间差异，对该区域中的山区和平原区的人体舒适度指数和气象要素也进行了量化。山区和平原区的划分依据以区域的水资源分区界定，以SRTM 90 m数字高程数据为基础，Landsat卫星影像校对，对流域分区边界进行划分，采用兰伯特等角圆锥投影坐标系统，34°N、38°N作为双标准纬线，31.2°N作为原点纬度，柴达木流域总面积约27.6×10^4 km^2，其中，四周山区面积约14.5×10^4 km^2，底部盆地平原面积约为13.1×10^4 km^2。

1.3　研究方法

1.3.1　人体舒适度指数　2020年中国气象局发布标准QX/T570-2020《气候资源评价气候宜居城镇》[33]，其定义的人体舒适度指数主要考虑了温度、相对湿度、风速三个气象要素的影响，等级划分10个级别，具体分级范围及描述见表1。人体舒适度指数I_{BC}具体计算方法如下：

$$I_{BC}=(1.8T+32)-0.55\left(1-\frac{RH}{100}\right)(1.8T-26)-3.2\sqrt{W}$$

式中：T为气温（℃）；RH为相对湿度（%）；W为风速（m·s^{-1}）。

1.3.2　相关系数　本研究采用Pearson相关系数分析人体舒适度指数和气象要素之间的相关性。通过正态检验可得到显著性水平，通常以P值表示，一般以$P<0.01$表示非常显著。本研究采用$P<0.01$表征序列通过了显著性检验。

1.3.3　Hurst指数　本文采用英国水文学家Hurst提出的重标极差法计算Hurst指数[34]，该指数基于历

表1 人体舒适度指数(I_{BC})分级

Tab. 1 Index of human body comfort (I_{BC}) grading

等级	I_{BC}	级别	体感
1	≤25	冷、不舒适	寒冷、不舒适
2	26~38		较冷、大部分人不舒适
3	39~50		清凉、少部分人不舒适
4	51~58	舒适	偏凉、大部分人舒适
5	59~70		最为舒适
6	71~75		偏热、大部分人舒适
7	76~79	热、不舒适	闷热、少部分人不舒适
8	80~85		炎热、大部分人不舒适
9	86~89		暑热、不舒适
10	≥90		酷热、很不舒适

史时段序列数据预估未来发展趋势，定量描述时间序列信息的长期依赖性的方法，常用来衡量时间序列是否有长期记忆的一个指标，可表明趋势性的总体轮廓预测，已被广泛应用于水文、生态、气象等多个领域[35-37]。

Hurst指数用H表示，当$0.5<H<1$时，表明序列未来变化趋势与过去保持一致，H值越大，持续性越强；当H=0.5时，表明序列未来变化趋势与过去变化趋势无关；当$0<H<0.5$时，表明该序列未来变化趋势与过去相反，H值越小，反向趋势越强。该范围又可再细分为强或弱持续性[38]，具体范围为强反持续性($0<H\leq0.35$)，弱反持续性($0.35<H\leq0.5$)，弱持续性($0.5<H\leq0.65$)，强持续性($0.65<H\leq1$)。本研究根据该划分范围应用到气象要素和人体舒适度指数序列上，对未来变化情况进行预估。

2 结果与分析

2.1 气象要素分析

1979—2020年柴达木盆地多年平均气温约为0 ℃(表2)，平原区较山区高，分别为4 ℃和−3 ℃；全盆地包括山区和平原区均呈现增加趋势，平均增加趋势为0.035 ℃·a^{-1}；多年平均风速约3 m·s^{-1}，平原区略大，全盆地均呈现风速减小趋势，平均减小趋势为−0.013 m·s^{-1}·a^{-1}；盆地多年平均湿度约为0.003 kg·kg^{-1}，平原区与山区平均值大致相同，整个盆地均呈现湿度增大趋势，盆地平均增加趋势为10^{-5} a^{-1}。由此可见，过去近40 a，盆地整体呈现气温上升、风速减小、湿度增大的趋势。

2.2 人体舒适度指数分析

2.2.1 年际尺度 人体舒适度指数1979—2020年年际变化如图2所示，全盆地人体舒适度指数在等级2内，具体表现为较冷，大部分人不舒适；过去40 a来，该指数呈现增加趋势，每年平均增加约0.045。平原区人体舒适度在等级3内，具体表现为清凉、少部分人不舒适；山区人体舒适度指数在等级2内，较冷、大部分人不舒适。平原区较山区增加更为明显，分别为每年增加0.05和0.041，其中，平原区人体舒适度指数拟合线趋势的R^2值最大，达到0.61。

图3为全盆地人体舒适度指数多年平均分布及变化趋势，全盆地人体舒适度指数均低于45，平均值约35，最大为44，最小为−6，即冷、不舒适的等级内。平原区明显高于山区，东部和中部略高，在40以上，多属于等级3；接近平原的山区较大，越远离平原区越小，这与海拔和气温有关。全盆地人体舒适度指数变化趋势平均值为0.044 a^{-1}；其中，平原区内平均趋势比山区要高，平原区中部和东南部增加趋势最大，山区西南部海拔较高的地方，增加速率也较大。平原区区域内该指数变化趋势大部分均通过了显著性检验($P<0.01$)，山区仅南部和东部部分区域通过了显著性检验。

2.2.2 季节尺度 本文中四季按照春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月至次年2月)来划分。1979—2020年盆地春季平均人体舒适度指数由36增加到37，全盆地多年平均为36，最大为45，最小值为−2；夏季人体舒适度指数由45增加到47，全盆地多年平均为45，最大为55，最小值为

表2 1979—2020年气温、风速和比湿多年平均及变化趋势

Tab. 2 Multi-year average and trends of air temperature, wind speed, and specific humidity during 1979–2020

气象要素	气温		风速		比湿	
	多年平均/℃	变化趋势/(℃·a^{-1})	多年平均/(m·s^{-1})	变化趋势/(m·s^{-1}·a^{-1})	多年平均/(kg·kg^{-1})	变化趋势/(kg·kg^{-1}·a^{-1})
全盆地	0.41	0.035	2.93	−0.013	0.003	1x10^{-5}
山区	−2.27	0.032	2.75	−0.013	0.003	1x10^{-5}
平原区	3.88	0.039	3.16	−0.013	0.003	1x10^{-5}

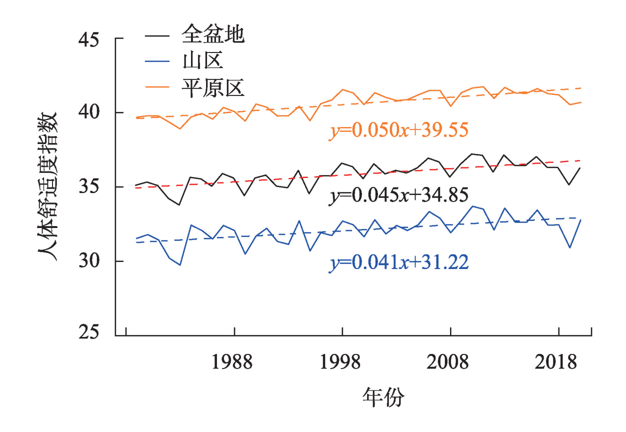
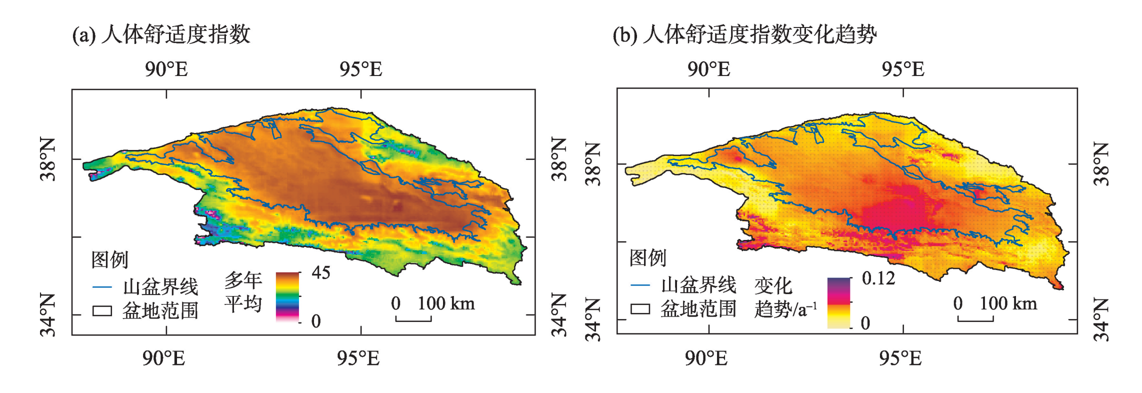


图2　全盆地、盆地山区及平原区年平均人体舒适度指数变化

Fig. 2　Variations of annual average I_{BC} of the entire basin, the mountain, and plain areas

7；秋季人体舒适度指数由35增加到37，全盆地多年平均为35，最大为43，最小值为-9；冬季人体舒适度指数由23变为22，全盆地多年平均为23，最大为32，最小值为-23。可以看到，四季中夏季部分平原区区域为人体舒适度指数超过了50，等级位于4级，达到舒适程度，其余季节均为冷、不舒适级别（图4）。季节分布中，人体舒适度指数在平原区整体比山区要高，平原区内舒适度空间差异不大，山区内海拔越高的地方，舒适程度越小，这种差异性在冬季尤为显著。

对四个季节做趋势分析发现，春季全盆地人体舒适度指数变化趋势为0.053 a^{-1}，夏季平均趋势为0.06 a^{-1}，秋季平均趋势为0.026 a^{-1}，冬季平均趋势为



注：(b)中阴影区域为通过$P<0.01$显著性检验。

图3　人体舒适度指数多年平均(a)和变化趋势(b)空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of multi-year average (a) and trends (b) of I_{BC}

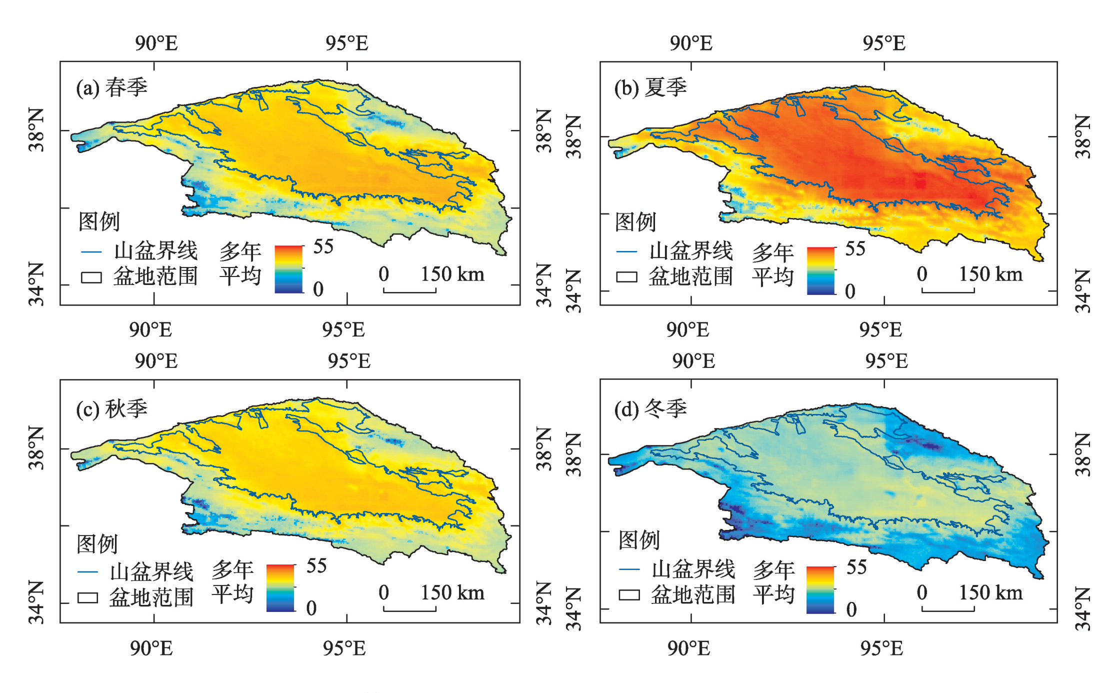
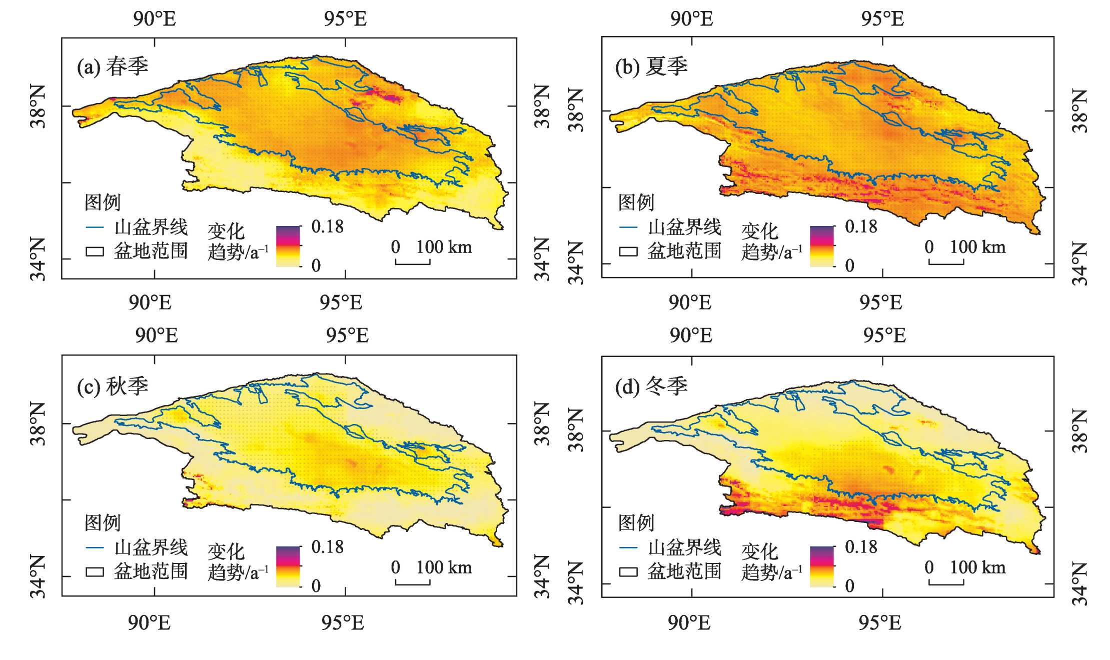


图4　1979—2020年人体舒适度指数春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)空间分布

Fig. 4　Spatial distributions with multi-year average I_{BC} in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d) during 1979–2020

0.034 a^{-1}，四季中夏季、春季、冬季、秋季变化趋势依次减少。其中，夏季全盆地均通过了显著性检验，春季和秋季平原区大部分区域通过了显著性检验，冬季盆地仅有南部部分区域通过显著性检验（图5）。

2.2.3　气象影响要素　通过将人体舒适度指数与气象要素做相关性分析，厘清影响人体舒适度指数变化的主要气象要素。由图6可知，人体舒适度指数与气温相关性表现为最强，该指数的变化趋势空间分布与气温变化趋势较为一致（图3b），全盆地均表现为正相关，相关系数达到0.9以上；人体舒适度指数与风速表现为负相关，但相关性在山区区域相对较小，说明在山区风速对人体舒适度指数变化的影响相对较弱；人体舒适度指数与湿度基本表现为正相关，在平原区相关系数较大，山区相关性较小，湿



注：图中阴影区域为通过P<0.01显著性检验。

图5　1979—2020年人体舒适度指数春季（a）、夏季（b）、秋季（c）和冬季（d）季节变化趋势

Fig. 5　Spatial distributions of trends of I_{BC} in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d) during 1979–2020

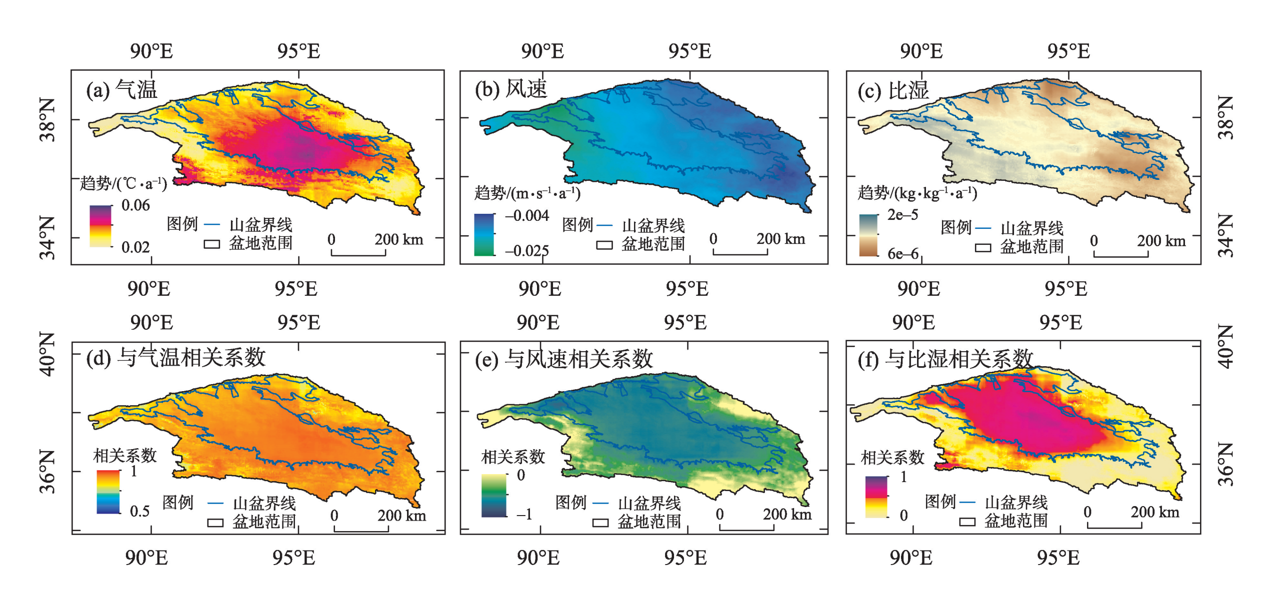


图6　1979—2020年气象要素气温（a）、风速（b）和比湿（c）的变化趋势及人体舒适度指数与气温（d）、风速（e）和比湿（f）的相关系数

Fig. 6　Trends of meteorological elements with air temperature (a), wind speed (b), and specific humidity (c) during 1979–2020, correlation coefficients of I_{BC} with air temperature (d), wind speed (e), and specific humidity (f)

表3 气温、风速、比湿和人体舒适度指数的Hurst指数

Tab. 3 Hurst index of temperature, wind speed, specific humidity, and I_{BC}

Hurst	气温			风速			比湿			人体舒适度指数		
指数	全盆地	山区	平原	全盆地	山区	平原	全盆地	山区	平原	全盆地	山区	平原
春季	0.87	0.87	0.89	1	1	1	0.86	0.87	0.86	0.82	0.81	0.84
夏季	0.81	0.78	0.82	1	1	1	0.81	0.79	0.82	0.81	0.78	0.85
秋季	0.71	0.67	0.77	1	1	1	0.83	0.83	0.84	0.62	0.61	0.72
冬季	0.8	0.8	0.82	1	1	1	0.91	0.91	0.9	0.78	0.81	0.77
年平均	0.82	0.8	0.84	1	1	1	0.92	0.93	0.92	0.79	0.77	0.86

注:红色为变量趋势增加且具有强持续性,黄色为趋势增加具有弱持续性,蓝色为趋势减小具有强持续性;颜色越深则持续性越强。

度的增加有助于人体舒适度指数的增加,朝着舒适性更高的等级增大。由此可见,平原区是在气温、风速、比湿共同作用下使得人体舒适度指数发生变化,而山区人体舒适度指数受气温影响较大。综上所述,1979—2020年近40 a来,气温和湿度增加、风速减小,均对全盆地区域内人体舒适度指数呈现为正贡献,使得舒适性由冷不舒适向舒适等级增加。

2.2.4 Hurst指数预测 通过结合气象要素和人体舒适度指数变化趋势与Hurst指数(表3),可以看出,气象要素中气温和比湿均呈现增加且强持续性的趋势,未来柴达木盆地气温将会继续升高、湿度增加,气温和湿度的增加仍会继续增加人体舒适度指数;风速呈现趋势减小且强持续性,风速的减小也会使得人体舒适度指数增大。除秋季山区外,其他季节山区和平原区均呈现人体舒适度指数趋势增加且也具有强持续性。秋季山区的弱持续性可能与秋季气温的弱持续性有关。由此可见,在未来一段时间内,柴达木盆地人体舒适性会由冷不舒适的级别朝着舒适级别发展,一方面风速减少和湿度的增加,可缓解山区和平原区干燥程度及风沙天气,气温的增加可明显增加山区海拔较高区域的舒适感受程度,有利于帮助提高盆地内人居体感与健康水平,也有助于盆地的气候资源及旅游开发;但另一方面,平原区气温较高地区有可能由于气温和湿度的增加导致极端天气或热浪的出现,降低人体舒适性感受。由于Hurst指数仅提供气象要素变化的初步预测,无法得知气象要素变化幅度,未来可利用不同气候情境下的大尺度未来气候数据,更为准确地预测人体舒适性的变化。

3 讨论

本研究利用高时空分辨率气象数据研究了柴达木盆地人体舒适度指数时空变化特征,探讨了气象要素的影响程度,可为盆地内气象舒适性研究、城市建设及旅游资源开发提供科学参考。相比已有研究,本研究数据精度较高、时间范围较长,能够更为精准地反映近40 a区域内人体舒适度指数变化特征。郭广等[39]研究了1960—2010年青海地区人体舒适度指数,在与本研究相同时间段内(1979—2010年),柴达木盆地地区整体上处于冷、不舒适等级,本研究与该结论一致。另外,由于研究时段和研究区域的差异,气象要素对人体舒适度指数的影响会有所不同[22-23,39]。

由于柴达木盆地气候和自然地理条件复杂,仅仅考虑温度、风速、湿度三个气象要素仍存在一定局限性,例如降雨、云量、日照、极端天气等因素的变化[40],也会影响到人体舒适性。另一方面,针对不同地区的人口和环境特点,人体舒适性实际感受可能与研究存在偏差,可结合实地走访调查数据与相关研究成果,对舒适性分级标准进行调整改进,以更适合该地区真实情况。在未来的研究中,一方面可以尽可能全面的考虑影响人体舒适性的要素,一方面基于实地走访调查针对当地人群实际感受改进评价分级标准,进而更好地开展气候舒适性评价研究。

4 结论

通过对1979—2020年柴达木盆地开展人体舒适度指数的量化分析,主要得出以下结论:

(1) 近40 a来,盆地整体呈现气温上升、风速减小、湿度增大的趋势。

(2) 在气象要素的影响下,人体舒适性年平均及年内四季均呈现增大的趋势;夏季平原区处于舒适等级,其他均为冷不舒适的等级。这种时空变化

趋势与气温的变化最为相关,其次为湿度和风速。

(3) 通过Hurst指数和变化趋势综合分析发现未来气象要素气温、风速和湿度均具有强持续性的特点,人体舒适度指数也会继续增加,除山区秋季为弱持续性外,全盆地其他季节均为强持续增大的趋势。因此,未来柴达木盆地人体舒适性会由冷不舒适的级别朝着舒适级别发展。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis[C]//Lee J Y, Marotzke J, Bala G, et al. Future Global Climate: Scenario-42 Based Projections and Near-term Information. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 1-195.

[2] 周天军, 陈梓明, 陈晓龙, 等. IPCC AR6 报告解读:未来的全球气候——基于情景的预估和近期信息[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 652-663. [Zhou Tianjun, Chen Ziming, Chen Xiaolong, et al. Interpreting IPCC AR6: Future global climate based on projection under scenarios and on near-term information[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 652-663.]

[3] 姜彤, 翟建青, 罗勇, 等. 气候变化影响适应和脆弱性评估报告进展: IPCC AR5 到 AR6 的新认知[J]. 大气科学学报, 2022, 45(4): 502-511. [Jiang Tong, Zhai Jianqing, Luo Yong, et al. Understandings of assessment reports on climate change impacts, adaptation and vulnerability: Progress from IPCC AR5 to IPCC AR6[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(4): 502-511.]

[4] Liu Y, Cai W, Lin X, et al. Nonlinear El Niño impacts on the global economy under climate change[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5887.

[5] 黄存瑞, 刘起勇. IPCC AR6报告解读: 气候变化与人类健康[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 442-451. [Huang Cunrui, Liu Qiyong. Interpretation of IPCC AR6 on climate change and human health[J]. Climate Change Research, 2022, 18(4): 442-451.]

[6] Wang J, Yan Z W. Rapid rises in the magnitude and risk of extreme regional heat wave events in China[J]. Weather and Climate Extremes, 2021, 34: 100379.

[7] Perkins-Kirkpatrick S E, Lewis S C. Increasing trends in regional heatwaves[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3357.

[8] de Freitas C R, Grigorieva E A. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices[J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(1): 109-120.

[9] Binarti F, Koerniawan M D, Triyadi S, et al. A review of outdoor thermal comfort indices and neutral ranges for hot-humid regions [J]. Urban Climate, 2020, 31: 100531.

[10] Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G, et al. Comparison of UTCI to selected thermal indices[J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56: 515-535.

[11] Epstein Y, Moran D S. Thermal comfort and the heat stress indices [J]. Industrial Health, 2006, 44(3): 388-98.

[12] Jendritzky G, de Dear R, Havenith G. UTCI—why another thermal index?[J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(3): 421-428.

[13] 蔚丹丹, 李山, 张粮锋, 等. 旅游气候舒适性评价:模型优化与中国案例[J]. 旅游学刊, 2021, 36(5): 14-28. [Yu Dandan, Li Shan, Zhang Liangfeng, et al. Evaluate tourism climate using modified holiday climate index in China[J]. Tourism Tribune, 2021, 36(5): 14-28.]

[14] 王国新, 钱莉莉, 陈韬, 等. 旅游环境舒适度评价及其时空分异——以杭州西湖为例[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2206-2216. [Wang Guoxin, Qian Lili, Chen Tao, et al. Evaluation of tourism environmental comfort and its spatial-temporal differentiation: A case study of West Lake in Hangzhou, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2206-2216.]

[15] 关靖云, 李东, 徐晓亮, 等. 近40年新疆旅游气候舒适期的时空格局及其演变研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 185-197. [Guan Jingyun, Li Dong, Xu Xiaoliang, et al. Spatial-temporal pattern and evolution of tourism climate comfort period in Xinjiang in recent 40 years[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(6): 185-197.]

[16] 官景得, 王咏青, 孙银川, 等. 近39 a宁夏旅游气候适宜期及变化分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 339-348. [Guan Jingde, Wang Yongqing, Sun Yinchuan, et al. Suitable period and change of tourism climate in Ningxia in the past 39 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 339-348.]

[17] 马丽君, 孙根年. 中国西部热点城市旅游气候舒适度[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 791-797. [Ma Lijun, Sun Gennian. Evaluation of climate comfort index for tourism hot-spot cities in west China [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(5): 791-797.]

[18] Matthews L, Scott D, Andrey J. Development of a data-driven weather index for beach parks tourism[J]. International Journal of Biometeorology, 2021, 65: 749-762.

[19] 雷桂莲, 喻迎春, 刘志萍, 等. 南昌市人体舒适度指数预报[J]. 江西气象科技, 1999(3): 40-41. [Lei Guilian, Yu Yingchun, Liu Zhiping, et al. Forecast of human body comfort index in Nanchang[J]. Jiangxi Meteorological Science and Technology, 1999(3): 40-41.]

[20] 贾传. 基于人体舒适度的近地表城市热岛效应研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2023. [Jia Chuan. Study on Near Surface Urban Heat Island Effect Based on Human Comfort[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2023.]

[21] Zheng Z. Characteristics of climate warming and human body comfort index in Beijing during last 50 years[J]. Advanced Materials Research, 2011, 183-185: 1105-1109.

[22] 胡琳, 胡淑兰, 苏静, 等. 陕西省人体舒适度变化及其对气象因子的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1450-1456. [Hu Lin, Hu Shulan, Su Jing, et al. Variation of comfort index of human body and its response to meteorological factors in Shaanxi Province[J].

Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1450-1456.]

[23] 高理, 刘焕彬. 1991—2021年山东省人体舒适度时空分布特征[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(3): 71-79. [Gao Li, Liu Huanbin. Spatial and temporal distribution of body comfort index in Shandong Province from 1991 to 2021[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(3): 71-79.]

[24] 曹永强, 赵慧, 李可欣, 等. 辽宁省气候舒适度变化及其对气象因子的响应[J]. 人民珠江, 2022, 43(8): 47-53. [Cao Yongqiang, Zhao Hui, Li Kexin, et al. Climate comfort changes and its response to meteorological factors in Liaoning Province[J]. Pearl River, 2022, 43(8): 47-53.]

[25] 黄鹤楼, 邹旭恺, 丁烨毅, 等. 气候变化对宁波四明山人体舒适度的影响[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(3): 316-324. [Huang Helou, Zou Xukai, Ding Yeyi, et al. The impact of climate change on human comfort in the Siming Mountains in Ningbo, China[J]. Climate Change Research, 2020, 16(3): 316-324.]

[26] 金满慧, 王兴丽, 张东琴, 等. 气候变暖背景下甘南高原人体舒适度时空分布特征[J]. 农业灾害研究, 2022, 12(6): 83-85. [Jin Manhui, Wang Xingli, Zhang Dongqin, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of human comfort in Gannan Plateau under the background of climate warming[J]. Agricultural Disaster Research, 2022, 12(6): 83-85.]

[27] 蔡嘉仪, 李长顺, 杨晓燕, 等. 福建省避暑旅游气候条件及适宜性分析[J]. 海峡科学, 2022(7): 14-19. [Cai Jiayi, Li Changshun, Yang Xiaoyan, et al. Analysis of climatic conditions and suitability of summer tourism in Fujian Province[J]. Strait Science, 2022 (7): 14-19.]

[28] 范琳, 刘楠, 赵力, 等. 荒漠类型自然保护区空间布局及区划[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(6): 80-92. [Fan Lin, Liu Nan, Zhao Li, et al. Spatial layout and regionalization of desert nature reserves[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(6): 80-92.]

[29] 屈欣, 郜学敏, 王萌, 等. 柴达木盆地地质遗迹资源评价[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 167-174. [Qu Xin, Gao Xuemin, Wang Meng, et al. Evaluation on the geological heritage resources of the Qaidam Basin, China[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(1): 167-174.]

[30] 阳坤, 姜尧志, 唐文君, 等. 第三极地区长时间序列高分辨率地面气象要素驱动数据集(TPMFD, 1979-2022)[DB/OL]. 国家青藏高原数据中心, 2023. [Yang Kun, Jiang Yaozhi, Tang Wenjun, et al. A high-resolution near-surface meteorological forcing dataset for the Third Pole region (TPMFD, 1979-2022)[DB/OL]. National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center, 2023.]

[31] 叶汀, 杨汉波, 霍军军. 西藏主要流域年径流的变化趋势及其原因[J]. 水力发电学报, 2023, 42(9): 46-57. [Ye Ting, Yang Hanbo, Huo Junjun. Change trends of runoff in major river basins in Tibetan Autonomous Region and their causes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(9): 46-57.]

[32] 佘王康, 杨勤丽, 阳坤, 等.青藏高原雪水比例时空变化特征[J]. 水科学进展, 2024, 35(2): 348-356. [She Wangkang, Yang Qinli, Yang Kun, et al. Spatiotemporal variation characteristics of snowfall-precipitation ratio on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(2): 348-356.]

[33] 中国气象局. 气候资源评价气候宜居城镇: QX/T570-2020[S]. 北京: 气象出版社, 2020. [China Meteorological Administration. Climate Resource Assessment- Climate Livable Cities: QX/T570-2020[S]. Beijing: China Meteorological Press, 2020.]

[34] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116(1): 770-799.

[35] 张钦, 唐海萍, 崔凤琪, 等. 基于标准化降水蒸散指数的呼伦贝尔草原干旱变化特征及趋势分析[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7110-7123. [Zhang Qin, Tang Haiping, Cui Fengqi, et al. SPEI-based analysis of drought characteristics and trends in Hulun Buir grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7110-7123.]

[36] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 849-858. [Zhang Zhiqiang, Liu Huan, Zuo Qiting, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000-2019[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 849-858.]

[37] 刘婷婷, 朱秀芳, 孙劭, 等. 阈值选择对高温时空变化特征的影响[J]. 地理科学, 2023, 43(4): 726-736. [Liu Tingting, Zhu Xiufang, Sun Shao, et al. Impact of threshold selection on the spatiotemporal change characteristics of high temperature[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(4): 726-736.]

[38] 雷杨娜, 张侠, 赵晓萌. 1971—2018年陕西省人体舒适度时空分布特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1417-1425. [Lei Yangna, Zhang Xia, Zhao Xiaomeng. Spatial-temporal distribution characteristics of comfort index of human body in Shaanxi Province from 1971 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1417-1425.]

[39] 郭广, 张静, 马守存, 等. 1961—2010年青海省人体舒适度指数时空分布特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 845-854. [Guo Guang, Zhang Jing, Ma Shoucun, et al. Spatial-temporal distribution characteristics analysis of comfort of human body index in Qinghai Province from 1961 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 845-854.]

[40] 张红丽, 韩富强, 张良, 等. 西北地区气候暖湿化空间与季节差异分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 517-531. [Zhang Hongli, Han Fuqiang, Zhang Liang, et al. Analysis of spatial and seasonal variations in climate warming and humidification in Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 517-531.]

Spatial-temporal variations and trends in the human body comfort index in the Qaidam Basin, China, during 1979−2020

ZHANG Qunhui[1], CHANG Liang[1,2,3], GU Xiaofan[1,2,3], WANG Qian[1], MA Maonan[4], LI Xiaodeng[1], DUAN Rui[1], YOU Xiangzhi[1]

(1. Xi'an Geological Survey Center, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Province Engineering Research Centre of Water Resources and Environment, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, China Geological Survey, Xi' an 710054, Shaanxi, China; 4. The Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Research on climate comfort assessment in the Qaidam Basin is of great significance for the environment, the development of liveable climate resources, and the construction of ecology and civilization. This study utilized surface meteorological datasets with a long time series from 1979−2020, as well as the index of human body comfort, to analyze the spatial-temporal changes in human comfort at the interannual and seasonal scales in the Qaidam Basin. The results indicated that (1) the human comfort level in the entire basin increased over the years and in different seasons. Most areas were cold and uncomfortable, with the exception of some areas in the summer plains at a sufficient comfort level. (2) the change in the index of human body comfort had the strongest correlation with the change in air temperature in the entire basin, with a correlation coefficient >0.9, followed by wind speed and humidity. The correlation was weaker in the mountainous areas than in the plains. (3) through comprehensive analysis of trends and the Hurst index, it was observed that the air temperature and specific humidity continued to elevate with a strong persistence, while wind speed showed the opposite trend; except for the weak persistence in autumn in some mountainous areas, the index of human body comfort showed a conspicuous and continuous increasing trend in other seasons both in the mountains and plains. This study can provide some reference for the study of climate suitability in the Qaidam Basin and other alpine regions.

Keywords: the index of human body comfort; spatial-temporal distributions; future trends; meteorological factors; Qaidam Basin